Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics, 36, 3, 2024. (69-92)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

Society of Manufacturing Engineering of Iran

Numerical Study of the Effect of Non-Uniform Magnetic Field on Ferrofluid Heat Transfer in a Channel with Double Forward-Facing Steps*

Research Article

Hamid-Reza Bahrami[1], Mahziyar Ghaedi[2]

DOI: 10.22067/jacsm.2024.85877.1228

Abstract *Nowadays, liquid cooling channels are used for cooling of electronic equipment. These channels have to change the cross-section to pass over elements, so they undergo sudden contractions or expansions. These changes create areas that are unfavorable for heat transfer. Various methods have been proposed to improve heat transfer in these areas. In the present study, the possibility of using a non-uniform magnetic field to improve heat transfer in a milli-channel including two sudden contractions has been discussed. In this study, it is assumed that a ferrofluid (EMG-805-a commercial brand) flows in the channel with a laminar regime, fully developed and steady state conditions. The walls of the channel are adiabatic, while the walls of the steps, which are in the vicinity of the electronic element, have a constant heat flux. The effects of different parameters, including locations of dipoles on the bottom and top walls, the number of dipoles, the Reynolds number, and the strength of the magnetic field on the improvement of heat transfer have been investigated. The obtained results show that the increase in Reynolds number and the strength of the magnetic field cause an increase in local Nusselt. The results show that applying a magnetic dipole on the bottom wall and just after the steps results in a significant increase in the local Nusselt number and an increase of 164.05% in the average Nusselt number compared to the case without a magnetic field.*

Keywords: Magnetic Field, Ferrofluid, Nusselt Number, Heat Transfer, Dipole, Forward Facing Step.

1- Introduction

Enhancing heat transfer in channels with obstacles and sudden contractions or expansions has been a focus for researchers, with applications in areas, including electronic cooling. Studies have explored different methods, such as nanofluids, barriers, and magnetic fields in channels with obstacles. However, channels with two consecutive steps have received less attention, presenting a research gap. This study aimed to utilize non-uniform magnetic fields in channels with double-forward steps to enhance heat transfer using numerical simulations with a specific ferrofluid (EMG-805, a commercial brand, Ferrotec) to analyze distinct factors, namely Reynolds number variations and magnetic field positioning.

2- Problem Description

The present research focuses on a two-dimensional milli-channel with consecutive contractions. The geometry and computing domain are illustrated in Figure 1, detailing the channel's dimensions and calculation area.

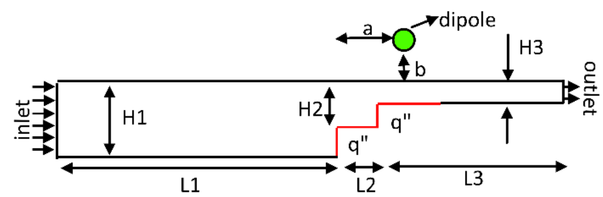


Figure 1. Schematic of the problem

3- Equations

The problem assumes two-dimensional incompressible flow, steady state, and constant fluid properties, neglects gravity, and incorporates magnetic field effects as volumetric forces. The equations can be found in Reference [4].

4- Fluids Properties

This study used the EMG-805 ferrofluid, a commercial product from Ferrotec Company. Some previous research [34, 42] presented the characteristics of the selected ferrofluid.

5- Mathematical Modeling

The problem was modeled using Ansys Fluent 2021 software, a finite volume-based numerical solver. A Coupled solver was employed for pressure and velocity, with second-order discretization for pressure, momentum, and energy equations. Convergence was achieved when the residual was below 10^{-8}.

6- Results and Discussion

This section presents modeling results, including dipole number and location, Reynolds number effects, magnetic

*Manuscript received: January 13, 2024. Revised, February 13, 2024, Accepted, March 26, 2024.

[1] Corresponding Author, Assistant professor of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran, **Email**: taleshbahrami@qut.ac.ir

[2] M.Sc. Student, Department of Mechanical Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran.

strength impact on the local Nusselt number, and overall Nusselt number variations.

Applying a magnetic dipole under the lower wall

In this section, a magnetic dipole is applied to the bottom wall, and its longitudinal distance (a) is changed to optimize cooling conditions. Figure 2 shows changes in the local Nusselt number. Applying a magnetic field alters the flow field due to interactions with ferrofluid and temperature/magnetic fields. The average Nusselt number was the highest at a longitudinal distance of zero and vertical distance of 1 mm, increasing by 56.57% compared to the case without a magnetic field.

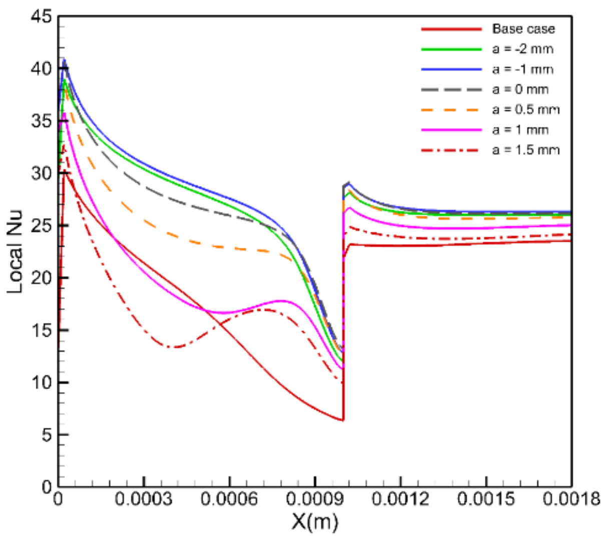


Figure 2. Variation of local Nusselt number with dipole location positioned under the lower wall

Applying a dipole on the upper wall

In this section, a magnetic dipole was applied to the top wall to optimize heat transfer. Changes in local Nusselt number with dipole location are observed (

Figure 3), with stronger effects closer to hot spots. Optimal cooling occurs when the dipole is positioned at 1.5 mm longitudinally, resulting in a 49.88% increase in average Nusselt compared to no magnetic field.

Applying dipole near critical areas

Placing magnetic dipoles on the bottom wall near steps improves average heat transfer by 164.05% in the optimal conditions as shown in Figure 4, occurring when the dipole is at a longitudinal distance of 0.25 mm and 1.25 mm behind steps, creating vortices that enhance heat transfer.

Applying two dipoles

This part explores the utilization of two dipoles simultaneously to enhance heat transfer. Various configurations were tested to find the optimal arrangement. Placing dipoles between steps yields more uniform local Nusselt variation. Despite some improvements, using two dipoles is not recommended due to complexity and marginal heat transfer enhancement. The average Nusselt increases by 183.14%, yet compared to the best single-dipole case, it only improves by 6.74%, making the use of two dipoles less favorable.

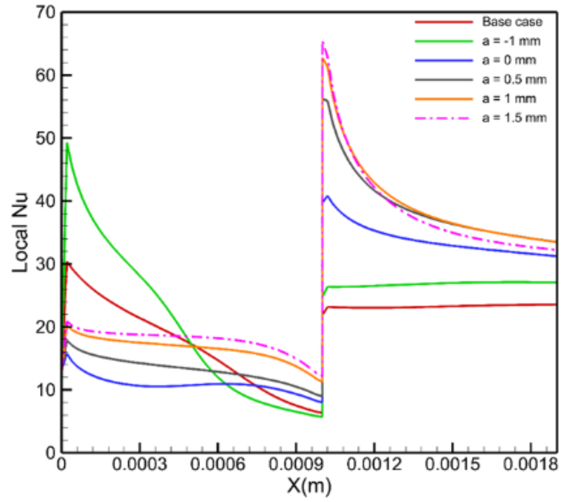


Figure 3. Variation of local Nusselt number considering dipole location position over the upper wall

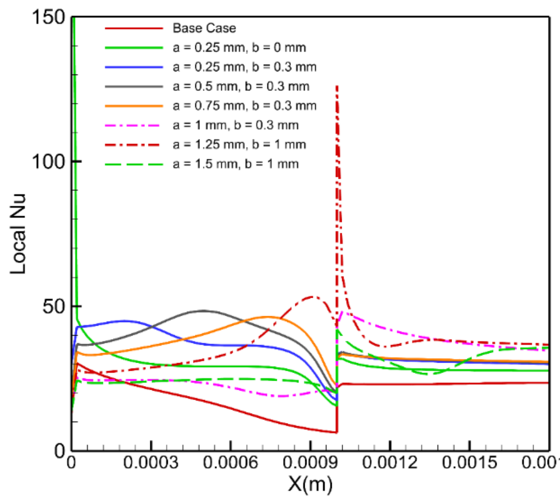


Figure 4. Effects of positioning dipoles on the critical points

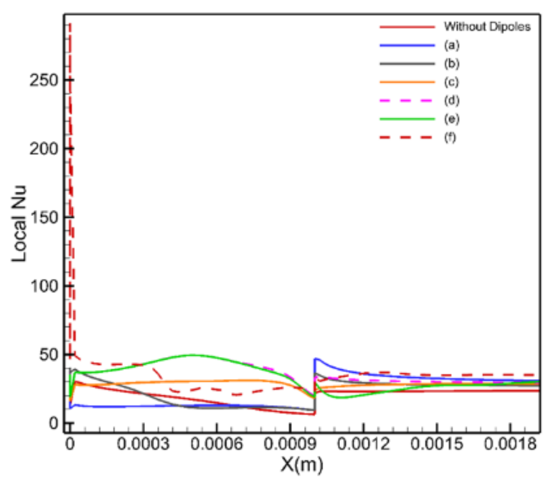


Figure 5. Using two dipoles with different arrangements ((a) $a_1 = -1$ mm, $a_2 = 1$ mm, $b_1 = 3$ mm, $b_2 = 3$ mm, (b) $a_1 = -1$ mm, $a_2 = 1.5$ mm, $b_1 = -1$ mm, $b_2 = 3$ mm, (c) $a_1 = -1$ mm, $a_2 = 0.75$ mm, $b_1 = -1$ mm, $b_2 = 0.3$ mm, (d) $a_1 = 0.5$ mm, $a_2 = 1.5$ mm, $b_1 = 0.3$ mm, $b_2 = 1$ mm, (e) $a_1 = 0.5$ mm, $a_2 = 1$ mm, $b_1 = 0.3$ mm, $b_2 = 3$ mm, (f) $a_1 = 0.25$ mm, $a_2 = 1.25$ mm, $b_1 = 0$ mm, $b_2 = 1$ mm)

7- Conclusions

Due to the critical need for effective cooling in compact electronic devices, the potential of magnetic dipoles to enhance heat transfer in front of a double-forward single-step was investigated. Results indicated that:

- Single dipole placement under the bottom wall significantly increased both local and average Nusselt numbers, with the most optimal condition yielding a 57.56% increase in average Nusselt number.
- Applying a single dipole over the upper wall also improved heat transfer but to a lesser extent. Optimal performance was achieved with a dipole located 1.5 mm away, resulting in a 49.88% rise in the average Nusselt number.
- Strategically placing dipoles in critical areas around the steps leads to the best thermal performance, with the highest average Nusselt (164.05%) achieved when placing a dipole at the back of the steps (longitudinal distance of 0.25 mm and vertical distance of 1.25 mm).
- The use of two dipoles increased both local and average Nusselt numbers by 183.14%, but the improvement was modest compared to a single dipole.
- Increasing the Reynolds number improved heat transfer but diminished the effect of the magnetic field caused by the dipole.
- The strength of the magnetic field significantly enhanced the local Nusselt number.

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک
http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

مطالعه عددی اثر میدان مغناطیسی غیر یکنواخت بر انتقال حرارت فروسیال در کانال با دو پله پیشرو*

مقاله پژوهشی

حمیدرضا بهرامی(۱) مهزیار قائدی(۲)

DOI: 10.22067/jacsm.2024.85877.1228

چکیده *امروزه برای خنک‌کاری تجهیزات الکترونیکی سامانه‌های رایانه‌ای، از کانال‌های خنک‌کننده مایع استفاده می‌شود. این کانال‌ها برای عبور از المان‌ها باید تغییر سطح مقطع بدهند، بنابراین دچار انقباض و یا انبساط ناگهانی می‌شوند. این تغییرات منجر به ایجاد نواحی می‌شود که از نظر انتقال حرارت نامساعد هستند. روش‌های مختلفی برای بهبود انتقال حرارت در این نواحی پیشنهاد شده است. در مطالعه حاضر، امکان استفاده از میدان مغناطیسی غیر یکنواخت برای بهبود انتقال حرارت در یک میلی‌کانال دارای دو انقباض ناگهانی پرداخته شده است. در این مطالعه فرض می‌شود فروسیال با خاصیت مغناطیسی (EMG-805-یک برند تجاری) با رژیم جریان آرام، توسعه یافته و پایا در میلی‌کانال جاری می‌شود. دیواره‌های کانال آدیاباتیک و تنها به دیواره‌های پله که در مجاورت المان الکترونیکی است، شار ثابت وارد می‌شود. اثرات مکان دوقطبی بر روی دیوارهای پایین و بالا، تعداد دوقطبی‌ها، عدد رینولدز و قدرت میدان مغناطیسی بر روی میزان بهبود انتقال حرارت بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که افزایش عدد رینولدز و قدرت میدان مغناطیسی موجب افزایش ناسلت محلی می‌شود. اعمال تک دوقطبی مغناطیسی بر دیوار پایین و دقیقا بعد از پله موجب افزایش قابل توجه عدد ناسلت محلی و افزایش ۱۶۴/۰۵٪ عدد ناسلت متوسط نسبت به حالت بدون میدان مغناطیسی می‌شود.*

واژه‌های کلیدی میدان مغناطیسی، فروسیال، عدد ناسلت، انتقال حرارت، دوقطبی، پله پیشرو.

مقدمه

بهبود انتقال حرارت به کمک روش‌های مختلف برای جریان درون کانال‌ها در سال‌های اخیر به طور گسترده مورد توجه محققان قرار گرفته است. در بیشتر کاربردهای صنعتی و واقعی، کانال‌ها به‌صورت مستقیم نبوده و در طول مسیر خود با موانعی مواجه می‌شوند. این هندسه‌ها در ادبیات فن به عنوان کانال‌های دارای انقباض یا انبساط ناگهانی (پله پیشرو یا پله پسرو) شناخته می‌شوند. به عنوان مثال، امروزه برای خنک‌کاری تجهیزات الکترونیکی مانند رایانه‌های خانگی و یا پردازشگرهای موازی از خنک‌کاری مایع استفاده می‌شود. بدین ترتیب، با عبور کانال‌های دارای سیال خنک‌کننده از روی تجهیزات الکترونیکی مانند سیستم پردازش مرکزی (CPU) و کارت گرافیک (GPU) خنک‌کاری انجام می‌شود [4-1]. از طرفی کانال‌های خنک‌کننده برای عبور از روی این تجهیزات باید تغییر سطح مقطع بدهند و بنابراین دچار انقباض و انبساط می‌شوند. به وجود آمدن پدیده جدایش و گردابه‌های تشکیل شده در این کانال‌ها که ناشی از انقباض یا انبساط ناگهانی است، شرایط خنک‌کاری و هیدرودینامیک جریان دچار تغییراتی می‌شود. مطالعات تجربی و

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۹/۲۳و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۱/۷ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران.
(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران.
Email: taleshbahrami@qut.ac.ir

عددی بسیاری توسط محققان بر روی این موضوعات انجام شده است. از اولین بررسی‌های انجام شده در این زمینه، می‌توان به تحقیق می و پلوتکین [5] اشاره کرد که در آن به حل ریاضی معادلات ناویر و استوکس برای هندسه‌های دارای پله پیشرو پرداختند. محققان دیگری [6, 7] گزارش کردند که در هندسه دارای پله پیشرو، با افزایش عدد رینولدز مقدار گرادیان‌ها و طول ناحیه جدایش کاملا تغییر می‌کند. باربوسا و آناند [8] به صورت عددی و در یک هندسه سه‌بعدی دارای پله پیشرو به بررسی اثر تغییرات عدد رینولدز بر میزان انتقال حرارت پرداختند. آن‌ها نشان دادند که در عدد رینولدز ۲۰۰ ناحیه جدایش، عدد ناسلت و میزان تنش برشی نسبت به جریان با عدد رینولدز ۸۰۰ کمتر است. استفاده از نانوسیال نیز ایده دیگری برای بهبود انتقال حرارت در این هندسه‌ها بوده است [12-9]. خربیت و همکاران [13] به - صورت تجربی به بررسی اثر نانوسیال بر میزان بهبود انتقال حرارت در یک میکرو کانال دارای پله پیشرو و/یا پسرو پرداخته- اند. در این مطالعه از آب مقطر به عنوان سیال پایه و سیلیسیم اکسید به عنوان نانوذره استفاده شده است. این مطالعه نشان داد که عدد ناسلت در میکروکانال دارای پله پیشرو تقریبا دو برابر میکروکانال دارای پله پسرو است. خربیت و همکاران [14] به بررسی عددی تأثیر استفاده از نانوسیال‌های مختلف با درصد حجمی متفاوت نانوذره بر میزان انتقال حرارت در یک میکروکانال دارای پله پیشرو پرداخت. در این مطالعه هندسه به صورت سه‌بعدی در نظر گرفته شده، رژیم جریان آرام و سیال پایه اتلین گلیکول با نانوذره‌های مختلف بوده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که بهترین نانوسیال برای افزایش انتقال حرارت، نانوسیال اتلین گلیکول با نانوذره سیلیسیم اکسید با درصد حجمی نانوذره ۴ درصد است. محققان دیگری [15, 16] نشان دادند که استفاده از مانع‌های استوانه‌ای در نزدیکی پله‌های پیشرو موجب بهبود انتقال حرارت در طول کانال می‌شود. برای بهبود انتقال حرارت در کانال‌های دارای پله از روش‌های متفاوت و متعددی استفاده شده است، یکی از روش‌ها استفاده از مانع قبل و بعد از پله است. بهرامی و طلائی [17] به استفاده از بافل‌های متخلخل با هندسه‌های متفاوت بعد از پله پسرو و تأثیر آن بر میزان انتقال حرارت پرداخته‌اند.

در برخی از کانال‌ها به دلایل مختلفی وجود دو پله پیشرو یا پسرو متوالی ناگزیر باشد. در این صورت پدیده‌های هیدرودینامیکی و حرارتی پیچیده‌تر می‌شود. به عنوان مثال، در کانال‌های دارای دو انقباض ناگهانی پدیده‌های، عدم تقارن انتقال حرارت و همچنین ناحیه جدایش دو بار متوالی مشاهده می‌شود. توگان و همکاران [18, 19] در دو مطالعه عددی به تأثیر وجود دو پله پیشرو متوالی در یک کانال با جریان آشفته پرداختند. همین طور به منظور بهبود انتقال حرارت از نانوسیال استفاده شده است. در مطالعه اول مشاهده می‌شود که استفاده از دو پله پیشرو موجب افزایش عدد ناسلت هنگام برخورد جریان به پله دوم می‌شود، همچنین کاهش ارتفاع پله‌ها موجب افزایش عدد ناسلت می‌شود. آن‌ها در مطالعه دوم با استفاده از نانوسیال هایبرید (مخلوط چند نانوذره متفاوت در سیال پایه) تلاش کردند که انتقال حرارت درون یک کانال عمودی دارای دو پله پیشرو را بهبود دهند. آن‌ها نشان دادند که بهترین انتقال حرارت زمانی اتفاق می‌دهد که پله اول دارای ارتفاع بیشتری باشد.

یکی از روش‌های بهبود انتقال حرارت که در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته است، استفاده از میدان‌های مغناطیسی خارجی در مقطع مورد نظر است. میدان مغناطیسی به‌عنوان یک روش فعال برای افزایش انتقال حرارت محسوب می‌شود. میدان مغناطیسی هنگامی که به کانال اعمال می‌شود می‌تواند موجب تشکیل گردابه در محل اعمال میدان شده که موجب می‌شود جریان از طرفی از روی سطح کانال جدا شود و از طرف دیگر به دلیل گردابه تشکیل شده جریان به دیگر سطح کانال بچسبد. این روش بسیار ساده و کارآمد است. معمولا در فضاهایی که از کانال‌های حاوی جریان خنک‌کننده برای بهبود انتقال حرارت در تجهیزات الکترونیکی می‌شود، سیم‌های حامل جریان‌های الکتریکی نیز وجود دارد. میدان مغناطیسی سیم‌های حامل جریان الکتریکی را می‌توان برای تغییر در الگوی جریان‌های فروسیال در کانال‌های مورد نظر استفاده شود.

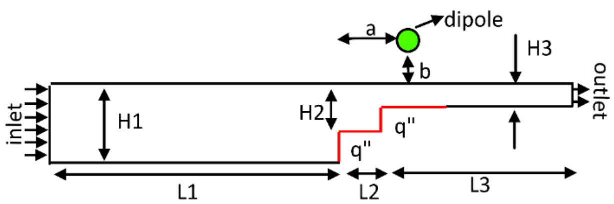
مطالعات زیادی در زمینه استفاده از فروسیال‌ها و استفاده از میدان مغناطیسی خارجی برای بهبود انتقال حرارت استفاده شده است. به عنوان مثال، گانگولی و همکاران [20] به بررسی تأثیر استفاده از یک و/یا چند دوقطبی مغناطیسی در یک کانال ساده و دوبعدی بر رژیم جریان و انتقال حرارت پرداخته‌اند. مطالعه

آن‌ها نشان می‌دهد که استفاده از میدان مغناطیسی موجب بهبود انتقال حرارت در اعداد رینولدز بسیار پایین می‌شود. از طرفی نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که هر قدر تعداد دوقطبی‌های مغناطیسی بیشتر با شد انتقال حرارت بهتر می شود. قا سمیان و همکاران [21] یک مطالعه عددی در زمینه استفاده از میدان مغناطیسی متناوب و یکنواخت در یک کانال دوبعدی و تأثیر آن بر بهبود انتقال حرارت پرداخته‌اند. محققان زیادی [27-22] در سال‌های اخیر از یک یا چند میدان مغناطیسی یکنواخت و غیر یکنواخت در کانال‌های ساده، سینک حرارتی و یا کانال‌های دارای پله استفاده کرده‌اند. بررسی ارتعاشات ناشی از میدان مغناطیسی در میکرولوله، ادغام و ترکیب میدان مغناطیسی، نانوسیال و دیگر قیدهای بهبود دهنده انتقال حرارت از جمله ناحیه متخلخل از جمله نوآوری‌ها و بررسی‌های نو انجام شده هستند [30-28].

مروری بر منابع انجام شده نشان می‌دهد که خاطر کوچک-شدن تجهیزات الکترونیکی تولید انتقال حرارت بر واجد سطح در تجهیزات الکترونیکی به‌شدت زیاد شده است. در نتیجه دیگر روش‌های انتقال حرارت رایج و سنتی نظیر استفاده از فن‌های هوا برای دفع حرارت جوابگو نیست؛ بنابراین از روش دیگری نظیر کانال‌های حاوی مایع برای دفع حرارت استفاده می‌شود. این کانال‌ها بعد از عبور از قطعات الکترونیکی دچار انقباض انبساط‌های ناگهانی می‌شود که رژیم جریان را تغییر داده و انتقال حرارت را تضعیف می‌کنند. روش‌های مختلفی مانند استفاده از نانوسیالات، استفاده از موانع، تغییر ساختار سطح و استفاده از میدان‌های مغناطیسی ثابت و یا غیر یکنواخت برای بهبود انتقال حرارت در این هندسه‌ها پیشنهاد شده که هر کدام مزایا و معایب خود را دارند. در این بین هندسه‌های با دو انقباض و دو انبساط علی‌رغم پیچیدگی بیشتر در ساختار جریان کمتر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. با توجه به تحقیقات نویسندگان، تا کنون مطالعه‌ای در مورد استفاده از میدان‌های مغناطیسی غیر یکنواخت برای بهبود انتقال حرارت در کانال‌های دارای دو پله پیشرو متوالی انجام نشده است، علی‌رغم اینکه سیم‌های حامل جریان (به عنوان منابع میدان مغناطیسی غیر یکنواخت بالقوه) در مدارهای الکتریکی به‌وفور در دسترس هستند؛ بنابراین کار حاضر در نظر دارد این خلأ تحقیقاتی را پر کند. کار مورد نظر به صورت عددی و با استفاده از فرو سیال‌های برند تجاری انجام خواهد شد و اثر عامل‌های مختلف نظیر عدد رینولدز، مکان میدان مغناطیسی و غیره بررسی می‌شوند.

هندسه و دامنه محاسباتی

هندسه مورد مطالعه، یک میلی‌کانال دوبعدی دارای دو انقباض متوالی است که در شکل (۱) ناحیه محاسباتی و ابعاد کانال مورد نظر قابل مشاهده است. ابعاد به صورت متریک هستند و فرض شده است که جریان فروسیال (EMG-805) پیش از ورود به کانال به حالت توسعه‌یافتگی رسیده است. محل میدان مغناطیسی با دو فاصله عمودی (b) و طولی (a) مشخص می‌شود. ابعاد میلی‌کانال در جدول (۱) قرار داده شده است. تمامی دیوارهای میلی‌کانال آدیاتیک و تنها به پله‌های پیشرو و دیوارهای مجاور آن‌ها شار ثابت q''_w اعمال شده است تا شرایط مشابه شرایط واقعی خنک‌کاری یک المان واقعی در یک بورد الکترونیکی باشد.



شکل ۱ شماتیک هندسه و ناحیه محاسباتی مسئله

جدول ۱ ابعاد مسئله

پارامتر	واحد	مقدار
H_1	میلی‌متر	۲
H_2	میلی‌متر	۱/۳۳۳۴
H_3	میلی‌متر	۰/۶۶۶۷
L_1	میلی‌متر	۳۰
L_2	میلی‌متر	۱
L_3	میلی‌متر	۱۶
a	میلی‌متر	وابسته به شرایط مسئله
b	میلی‌متر	وابسته به شرایط مسئله

معادلات حاکم بر مسئله

معادلات حاکم بر مسئله برای ناحیه محاسباتی به صورت دوبعدی است. فرض می‌شود که جریان تراکم‌ناپذیر، پایا و آرام است. از

اثرات نیروی حجمی گرانش صرف نظر شده است. اثرات میدان مغناطیسی به صورت یک نیروی حجمی در دو راستای x و y به معادله مومنتوم در دو راستا اضافه می‌شود. فرض می‌شود که خواص ترموفیزیکی سیال ثابت است. با توجه به نکات ذکر شده، معادلات پیوستگی (۱)، مومنتوم (۲) و (۳) و انرژی (۴) به صورت زیر بیان می‌شوند:

معادله پیوستگی [31]:

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0 \tag{۱}$$

معادله انرژی [32]:

$$\rho C_p\left(u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}\right)=k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \tag{۲}$$

معادلات مومنتوم [33]:

$$\rho\left(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}\right)=-\frac{\partial P}{\partial x}+\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)+S_x \tag{۳}$$

$$\rho\left(u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}\right)=-\frac{\partial P}{\partial y}+\mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)+S_y \tag{۴}$$

دو مؤلفه S_x و S_y بیانگر نیروی حجمی ناشی از میدان مغناطیسی خارجی است که به میلی کانال اعمال شده است و اثرات میدان مغناطیسی در معادلات مومنتوم (۳) و (۴) لحاظ می‌شوند. برای بیان نیرویی میدان مغناطیسی در معادلات مومنتوم لازم است که محاسبات و معادلاتی را در زمینه الکترومغناطیس بیان و ساده‌سازی کرد. استفاده از قوانین الکترومغناطیس و معادلات ماکسول برای بیان میدان مغناطیسی به زبان ریاضی استفاده می‌شود. در ابتدا با استفاده از قوانین آمپر (۵) و گاوس (۶) به ترتیب، شدت میدان مغناطیسی و شار مغناطیسی بیان می‌شوند [34]:

$$\vec{\nabla}\times\vec{H}=0 \tag{۵}$$

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{B}=0 \tag{۶}$$

برای شبیه‌سازی میدان مغناطیسی از مدل لانژوین (Langevin) استفاده می‌شود. این مدل با در نظر گرفتن اشباع مغناطیس در نانوذرات به هنگام اعمال میدان مغناطیسی، شرایط و اثر اعمال میدان مغناطیسی را بر روی جریان فروسیال شبیه‌سازی می‌کند. مؤلفه و خاصیت مغناطش (Magnetization) بین شار و شدت مغناطیسی به صورت زیر ارتباط ریاضی برقرار می‌کند [35]:

$$\vec{B}=\mu_0\left(\vec{M}+\vec{H}\right) \tag{۷}$$

در ادامه به کمک بردار میدان مغناطیسی (Magnetic field vector)، پتانسیل اسکالر مغناطیسی (Magnetic scalar potential) (۸) برای یک سیم حامل جریان تعریف می‌شود. سپس با استفاده از معادلات ریاضی (۹)، بردار میدان مغناطیسی غیر یکنواخت در مختصات قطبی (۱۰) و کارتزین (۱۱ و ۱۲) بیان می‌شود [36]:

$$\vec{H}=-\vec{\nabla}\cdot V_m \tag{۸}$$

$$V_m(x,y)=\frac{m\sin\theta}{r} \tag{۹}$$

$$\vec{H}(r,\phi)=\frac{m}{r^2}\left(\sin(\phi)\,\hat{e}_r-\cos(\phi)\,\hat{e}_\theta\right) \tag{۱۰}$$

$$\phi=\tan^{-1}\left(\frac{y-b}{x-a}\right) \tag{۱۱}$$

$$r=\sqrt{(x-a)^2+(y-b)^2} \tag{۱۲}$$

مغناطش فروسیال (M) با استفاده از تابع و معادلات لانژوین از طریق رابطه (۱۳) بیان می‌شود [24]:

$$\vec{M}=M_s L(\alpha)\frac{\vec{H}}{|\vec{H}|} \tag{۱۳}$$

حداکثر مقدار قابل دسترس مغناطش برای فروسیال را می‌توان به کمک رابطه (۱۴) تعریف کرد که در این رابطه متغیر α بیان‌کننده نسبت انرژی مغناطیسی به انرژی حرارتی است که از طریق رابطه (۱۵) تشریح می‌شود [37]:

$$L(\alpha)=\frac{1}{\tanh(\alpha)}-\frac{1}{\alpha} \quad (۱۴)$$

$$\alpha=\frac{\pi}{6}\frac{\mu_0 M_d|\vec{H}|d^3}{k_B T} \quad (۱۵)$$

در رابطه (۱۵)، d بیانگر قطر میانگین ذرات جامد نانومغناطیس، M_d دامنه مغناطش، $\mu_0=4\pi\times10^{-7}\left(\frac{N}{A^2}\right)$ نفوذپذیری مغناطیسی در خلأ و $k_B=1.38\times10^{-23}\,J/K$ ثابت بولتزمن است. دامنه مغناطش در رابطه (۱۶) تعریف می‌شود و مؤلفه ϕ غلظت نانوذرات مغناطیسی در فروسیال است. در نهایت با استفاده از روابط (۵) تا (۱۶) اثر میدان مغناطیسی به‌صورت یک نیرو بر واحد حجم در رابطه (۱۷) تعریف می‌شود و در معادلات مومنتوم لحاظ می‌شود [38]:

$$M_d=\frac{M_s}{\phi} \quad (۱۶)$$

$$S_k=M_s L(\alpha)\vec{\nabla}\left(\left(\vec{H}\cdot\vec{H}\right)^{0.5}\right) \quad (۱۷)$$

معادلات مورد نیاز جریان از جمله عدد رینولدز، عدد ناسلت، قطر هدرولیک و توسعه‌یافتگی جریان به ترتیب در روابط (۱۸) تا (۲۱) بیان شده‌اند [39]:

$$Re=\frac{\rho\bar{V}D_h}{\mu} \quad (۸)$$

$$Nu=h\times\frac{D_h}{k} \quad (۹)$$

$$D_h=2H_1 \quad (۱۰)$$

$$u=6U_{mean}\left[\frac{y}{h}-(\frac{y}{h})^2\right] \quad (۱۱)$$

خواص ترموفیزیکی فروسیال مورد استفاده

فروسیال‌ها در علم مهندسی کاربرد بسیار زیادی دارند [40]. در مطالعه حاضر استفاده از فروسیال EMG-805 که یک برند تجاری است که توسط شرکت فروتک (Ferrotec) تولید می‌شود [41]، به‌عنوان فروسیال انتخاب شده است. مشخصات فروسیال مورد نظر در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲ خواص ترموفیزیکی و مغناطیسی فروسیال مورد استفاده [34, 42]

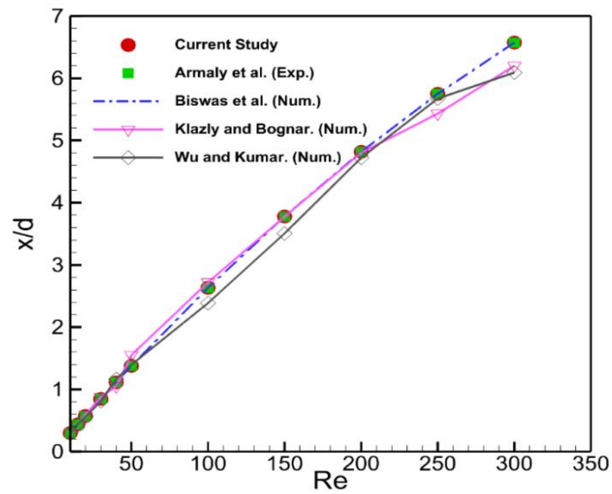
پارامتر	واحد	مقدار
چگالی (ρ)	kg/m^3	۱۱۹۰
گرمای ویژه (C_p)	J/kg-K	۳۴۷۵/۲
هدایت حرارتی (K)	W/m.K	۰/۶۷
لزجت (μ)	Pa.S	۰/۰۰۳
کسر حجمی جامد ($\emptyset$)	%	۳/۶
مغناطش اشباع (M_s)	mT	۲۲
حساسیت مغناطیسی (χ_{ff})	–	۲/۸۹

روش مدل‌سازی ریاضی

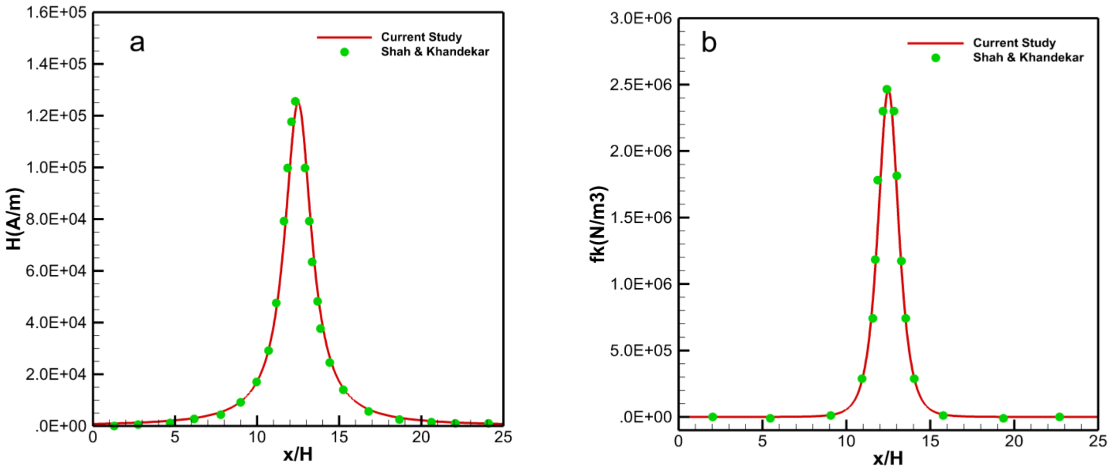
برای مدل‌سازی مسئله مورد نظر از نرم‌افزار انسیس فلوئنت ۲۰۲۱ (Ansys Fluent 2021 R1) که حلگر عددی بر اساس حجم محدود است، استفاده شده است. نوع حلگر کوپل برای فشار و سرعت و گسسته‌سازی معادلات فشار، مومنتوم و انرژی از مرتبه دو هستند. برای اطمینان از همگرایی، همه معادلات تا دستیابی به باقی‌مانده کمتر از $۱۰^{-۸}$ حل می‌شوند. برای مدل‌سازی از سیستم با پردازنده نسل ۷ و پردازنده ۲٫۷ گیگاهرتز استفاده شده است و مقدار حافظه سیستم ۱۶ گیگابایت است.

اعتبارسنجی

قبل از مدل‌سازی اصلی مسئله، لازم است از اعتبار درستی روش حل اطمینان حاصل شود. در این بخش دو اعتبارسنجی مختلف ارائه شده است. اعتبارسنجی اول با مطالعات محققان در حوزه تغییر جریان پس از عبور از جریان در کانال دارای پله پسرو است. آرملی و همکاران [43] به‌صورت تجربی، بیسواس و همکاران [44]، کلیزلی و بوگنار [45]، وو و کومار [46] به‌صورت عددی به بررسی تأثیر استفاده از پله پسرو بر هدرودینامیک جریان پرداخته‌اند. در شکل (۲) نتایج صحت‌سنجی مطالعه حاضر در مورد طول جدایش با نتایج محققان یاد شده ارائه شده است. همان گونه که ملاحظه می‌شود کار حاضر هم‌خوانی مناسبی با نتایج تحقیقات قبلی دارد.



شکل ۲ اعتبارسنجی مطالعه اخیر با مطالعات تجربی و عددی، آرملی و همکاران [43]، بیسواس و همکاران [44]، کلیزلی و بوگنار [45]، وو و کومار [46]



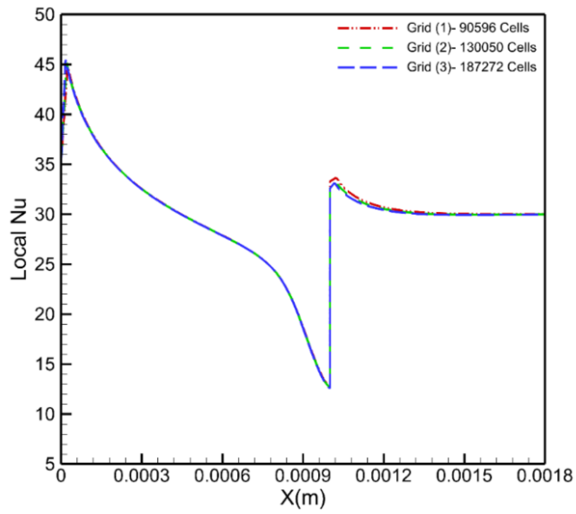
شکل ۳ اعتبارسنجی مطالعه اخیر با شاه و خندکار [24] (a) اعتبارسنجی شدت میدان مغناطیسی (b) اعتبارسنجی نیروی حجمی ناشی از میدان مغناطیسی

در بخش دوم درستی استفاده از میدان مغناطیسی خارجی صحت‌سنجی شده است. برای این کار از حل عددی شاه و خند-کار [24] استفاده شده است. آن‌ها در مدل‌سازی خود تأثیر استفاده از میدان مغناطیسی بر جریان فروسیال در یک کانال دوبعدی را برای جریان آرام بررسی کرده‌اند. در این اعتبارسنجی فروسیال EMG-805 با عدد رینولدز ۲۵ در کانال دوبعدی جریان دارد. نتایج این مقایسه برای دو وضعیت میزان نیروی اعمال شده بر فروسیال و نیز بزرگی میدان مغناطیسی در شکل (۳) مقایسه شده است. همان گونه که ملاحظه می‌شود، مطالعه حاضر دقت مناسبی دارد.

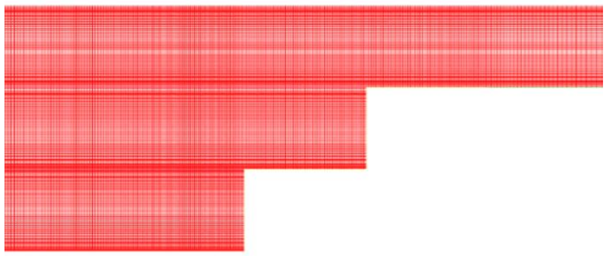
مطالعه شبکه

در مدل‌سازی‌های عددی یکی از گام‌های اصلی مطالعه شبکه‌بندی هندسه مورد نظر است. با بررسی مطالعات گذشته [24,36,47] نتیجه می‌شود هنگام استفاده از میدان مغناطیسی شبکه‌بندی بسیار اهمیت پیدا می‌کند. در این مطالعه سه شبکه‌بندی غیر یکنواخت مربعی متفاوت برای بررسی استقلال عددی از شبکه در نظر گرفته شده‌اند. بدین منظور، رینولدز جریان ۵۰، شار حرارتی $۱۰^{۵}$ وات بر مترمربع، دوقطبی مغناطیسی با قدرت یک آمپر در متر در نزدیکی پله پیشرو برای هندسه شکل (۱) به‌عنوان شرایط مرزی و ورودی مسئله در نظر گرفته شده است. با افزایش رینولدز گرادیان‌های نزدیک دیواره‌ها اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند و استفاده از شبکه‌بندی ریز و غیر یکنواخت در نزدیکی دیواره توصیه می‌شود. اطمینان از استقلال حل عددی

از شبکه با بررسی عدد ناسلت انجام می‌شود. در شکل (۴) مشاهده می‌شود با افزایش مقدار شبکه‌بندی، نتایج تطابق بیشتری دارند و مطابق با نتایج شکل (۴)، کانال با تعداد شبکه ۱۳۰۰۵۰ به عنوان شبکه بهینه و اصلی برای مدل‌سازی‌ها انتخاب می‌شود. شکل (۵) یک نمونه شبکه‌بندی را در برای این کار نشان می‌دهد.



شکل ۴ مطالعه استقلال حل عددی از شبکه، (در عدد رینولدز = ۵۰ و شار حرارتی = 10^5 وات بر مترمربع)



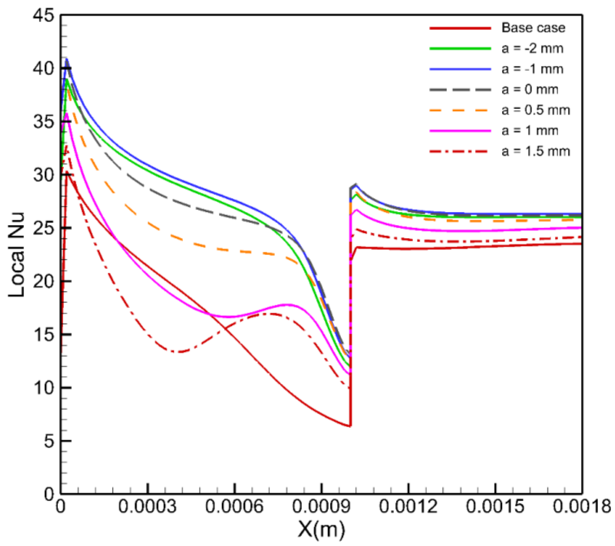
شکل ۵ شبکه‌بندی بهینه با تعداد ۱۳۰۰۵۰ شبکه

نتایج و بحث

در این بخش به ترتیب نتایج مدل‌سازی‌ها همچون تعداد و محل بهینه دوقطبی، تأثیر عدد رینولدز، تأثیر مقاومت مغناطیسی در مقدار عدد ناسلت محلی و عدد ناسلت ارائه می‌شود.

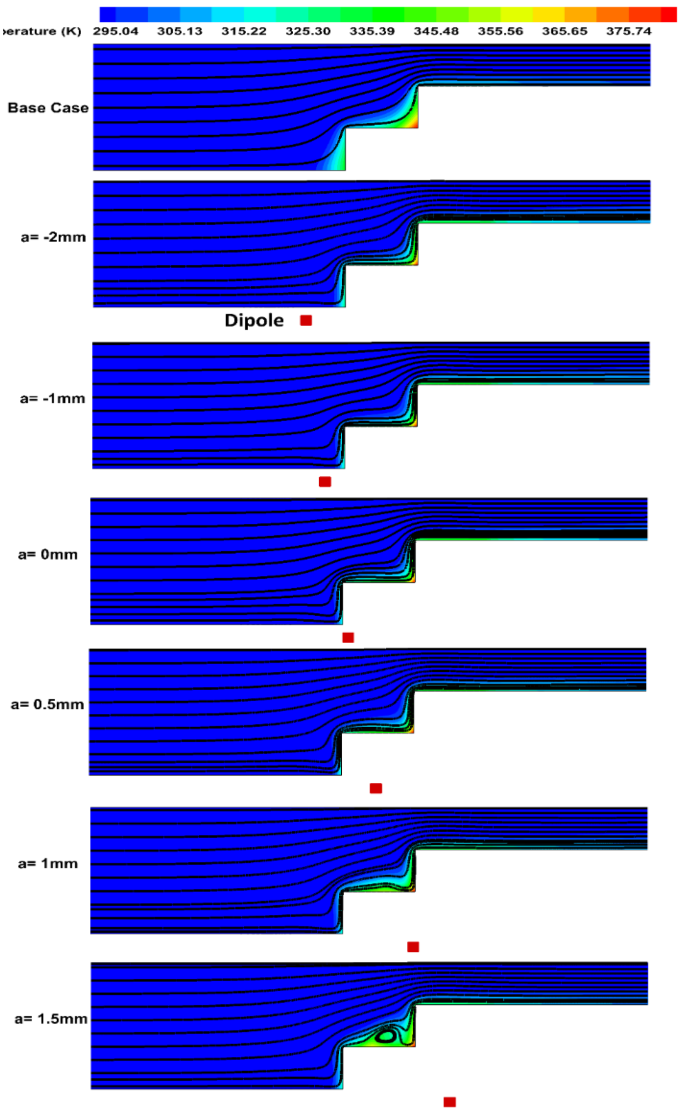
اعمال تک دوقطبی مغناطیسی بر دیوار پایین

در این بخش یک دوقطبی مغناطیسی بر دیوار پایین اعمال می‌شود. با تغییر فاصله طولی (a) و ثابت ماندن فاصله عمودی (b) دوقطبی، به دنبال شرایط بهینه برای خنک‌کاری هستیم. شکل (۶) و (۷)، به ترتیب تغییرات عدد ناسلت محلی و کانتور دمای استاتیک مطابق با محل اعمال دوقطبی ارائه شده است. با بررسی حالت نتایج بدون اعمال میدان مغناطیسی ملاحظه می‌شود که تغییرات عدد ناسلت مشابه مطالعات گذشته محققان [19,48] است که در آن در گوشه پایین پله‌های پیشرو به خاطر جدایش جریان عدد ناسلت بسیار کاهش می‌یابد. با اعمال میدان مغناطیسی، در اثر اندرکنش‌های میدان و فروسیال و میدان‌های دما و مغناطیسی، میدان جریان تغییر می‌کند. ملاحظه می‌شود که متناسب با مکان دوقطبی میدان جریان و عدد ناسلت محلی دستخوش تغییر می‌شود. مطابق شکل (۶) و (۷) ملاحظه می‌شود که هر قدر دوقطبی به سمت راست حرکت می‌کند، به دلیل اینکه میدان به مناطق داغ‌تری اعمال می‌شود، مطابق رابطه (۱۳) مغناطش فروسیال بزرگ‌تر شده و در نتیجه همان طوری که انتظار می‌رود نیروی حجمی بزرگ‌تری بر میدان جریان وارد می‌شود. در نتیجه وقتی میدان در راست‌ترین نقطه قرار دارد، یعنی در ۱٫۵ =a میلی‌متر، گردابه بزرگی بر روی دیواره مابین دو پله ایجاد می‌شود که جریان را از روی سطح بلند کرده و انتقال حرارت را با مشکل مواجه می‌کند؛ بنابراین ملاحظه می‌شود که بر روی دیواره مابین دو پله دما بالا رفته که این به نفع قطعه زیرین نیست. مطابق شکل (۸) که نتایج ناسلت متوسط را متناسب با محل دوقطبی مغناطیسی نشان می‌دهد، نتیجه می‌شود که بیشترین میزان ناسلت متوسط در فاصله طولی (صفر میلی‌متر) و فاصله عمودی ثابت (یک میلی‌متر) که دقیقا پایین پله اول است حاصل می‌شود و مقدار ناسلت متوسط در مقایسه با حالت بدون میدان مغناطیسی مقدار، ۵۶/۵۷٪ افزایش‌یافته است.

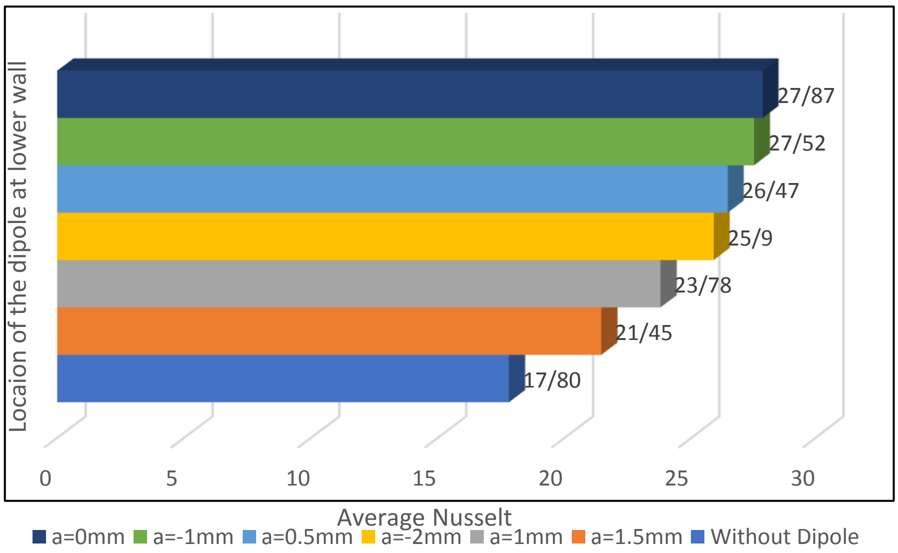


شکل ۶ تغییرات عدد ناسلت محلی با تغییر محل دوقطبی بر دیوار پایین

(رینولدز=۲۵، قدرت=۱ آمپر-متر)



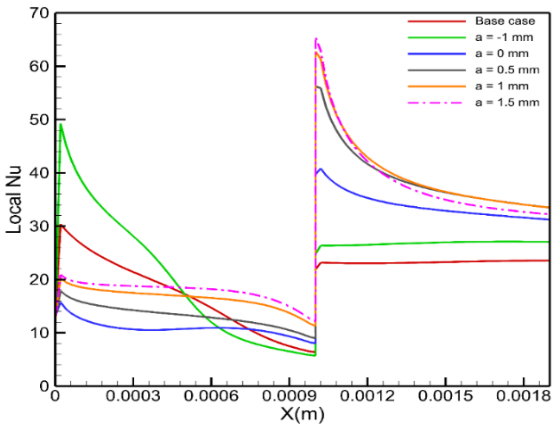
شکل ۷ تغییرات کانتورهای دما و خطوط جریان با تغییر محل دوقطبی بر دیوار پایین (رینولدز=۲۵، قدرت=۱ آمپر-متر)



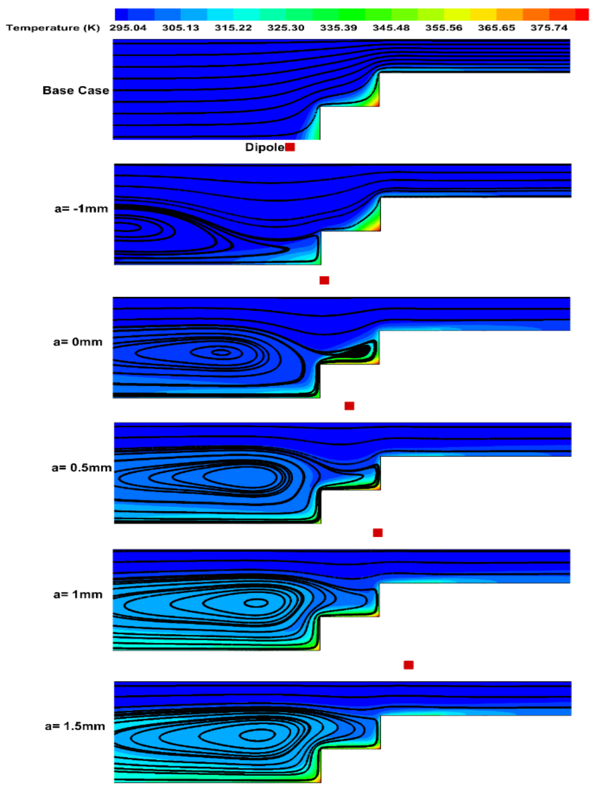
شکل ۸ تغییرات عدد ناسلت متوسط با تغییر محل دوقطبی بر دیوار پایین (رینولدز=۲۵، قدرت=۱ آمپر-متر)

اعمال تک دوقطبی مغناطیسی بر روی دیوار بالا

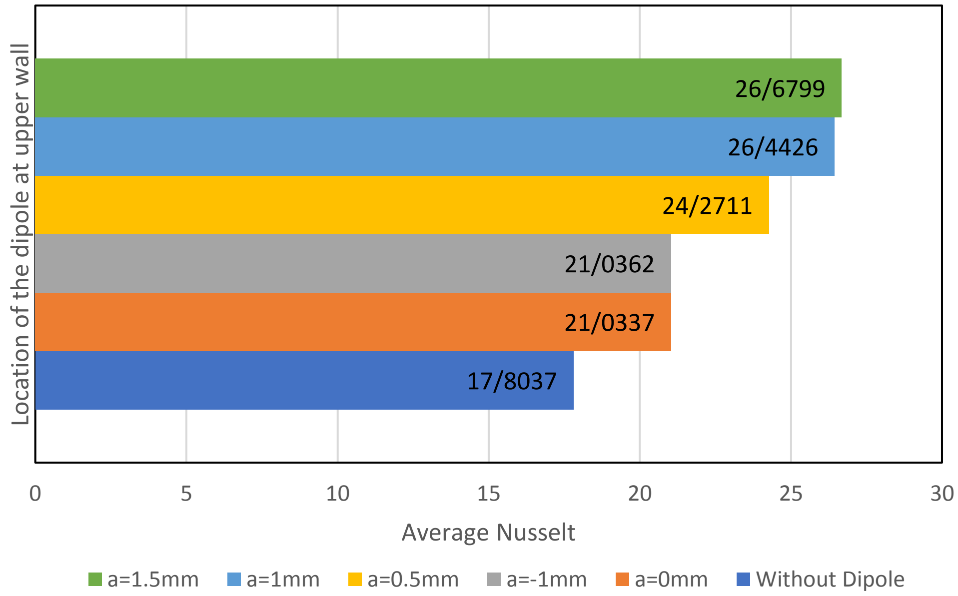
در این بخش، یک دوقطبی مغناطیسی تنها بر روی دیوار بالا اعمال می‌شود. با تغییر فاصله طولی (a) و ثابت ماندن فاصله عمودی (b) دوقطبی، تلاش می‌شود تا حالت بهینه برای خنک‌کاری یافت شود. در این بخش در تمامی مدل‌ها، دوقطبی در فاصله عمودی ۳ میلی‌متر قرار دارد. با اعمال دوقطبی بر دیوار بالای کانال، یک نیروی حجمی پادساعت‌گرد بر دیوار کانال توسط دوقطبی وارد می‌شود. مطابق شکل (۹)، با تغییر مکان دوقطبی عدد ناسلت محلی تغییر می‌کند. مجددا ملاحظه می‌شود که هر قدر دوقطبی فاصله کمتری با محل‌های داغ داشته باشد، اثر آن بر ویدا جریان پررنگ‌تر می‌شود و گردابه‌های بزرگ‌تری ایجاد می‌شود. این گردابه‌ها تنها زمانی مفید هستند که بتواند الگوی جریان و دما بر روی دیواره داغ را به‌گونه‌ای تغییر دهند که نتیجه مثبتی بر روی انتقال حرارت داشته باشند. می‌توان گفت که فیزیک جریان در نواحی نزدیک پله ناشی از تعامل پیچیده‌ای بین میدان مغناطیسی و خود پله‌ها است. از طرفی میدان مغناطیسی بر فروسیال اثر کرده و نیروی حجمی ایجاد می‌کند که این نیرو با افزایش دما بزرگ‌تر می‌شود. از طرفی هندسه پله‌ها نیز خود منجر به گرادیان‌های مثبت و منفی در نواحی مختلف ایجاد می‌کنند. مطابق شکل (۱۰) ملاحظه می‌شود که با تغییر محل دوقطبی الگوی خطوط جریان نیز بزرگ‌تر می‌شود. مطابق با شکل (۹) و شکل (۱۰)، خنک‌کاری هنگامی که دوقطبی در فاصله طولی ۱٫۵ میلی‌متر است، بهترین عملکرد خود را دارد. در شکل (۱۱)، تغییرات عدد ناسلت متوسط متناسب با تغییر فاصله طولی دوقطبی مشاهده می‌شود که بهترین شرایط در فاصله طولی ۱٫۵ میلی‌متر به دست می‌آید و مقدار ناسلت متوسط در مقایسه با حالت بدون میدان مغناطیسی مقدار، ۴۹/۸۸٪ افزایش یافته است.



شکل ۹ تغییرات عدد ناسلت محلی با تغییر محل دوقطبی بر دیوار بالا (رینولدز=۲۵، قدرت=۱ آمپر-متر)



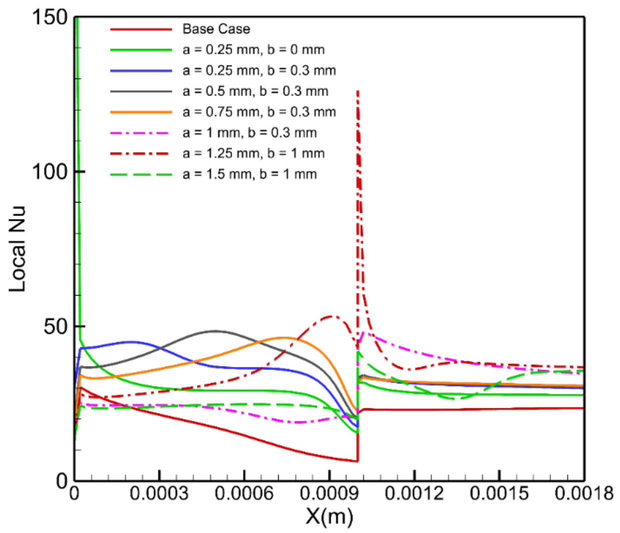
شکل ۱۰ تغییرات کانتورهای دما و خطوط جریان با تغییر محل دوقطبی بر دیوار بالا (رینولدز=۲۵، قدرت=۱ آمپر–متر)



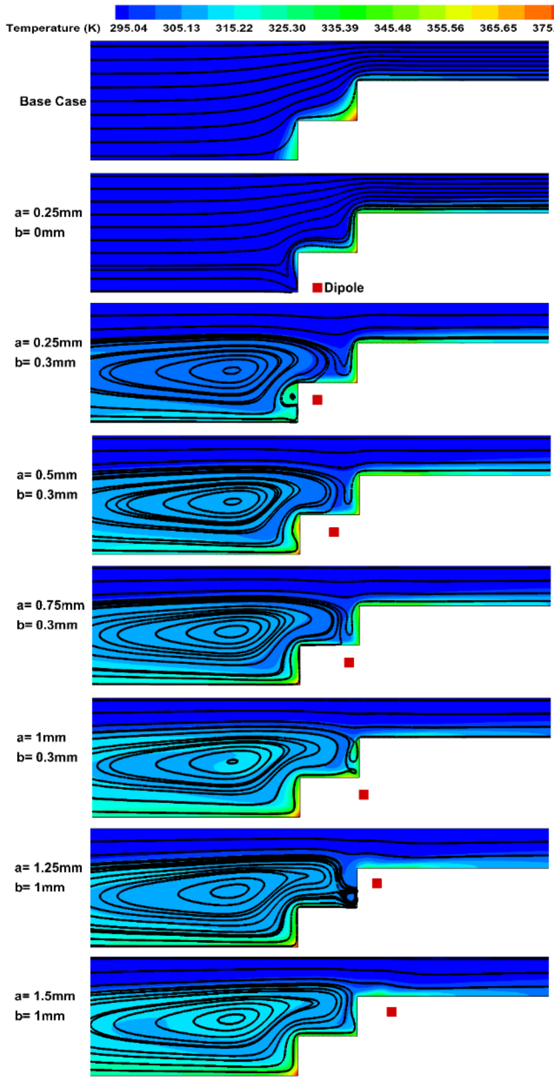
شکل ۱۱ تغییرات عدد ناسلت متوسط با تغییر محل دوقطبی بر دیوار بالا (رینولدز=۲۵، قدرت=۱ آمپر–متر)

اعمال تک دوقطبی مغناطیسی بر نواحی بحرانی و گوشه‌های پله‌ها

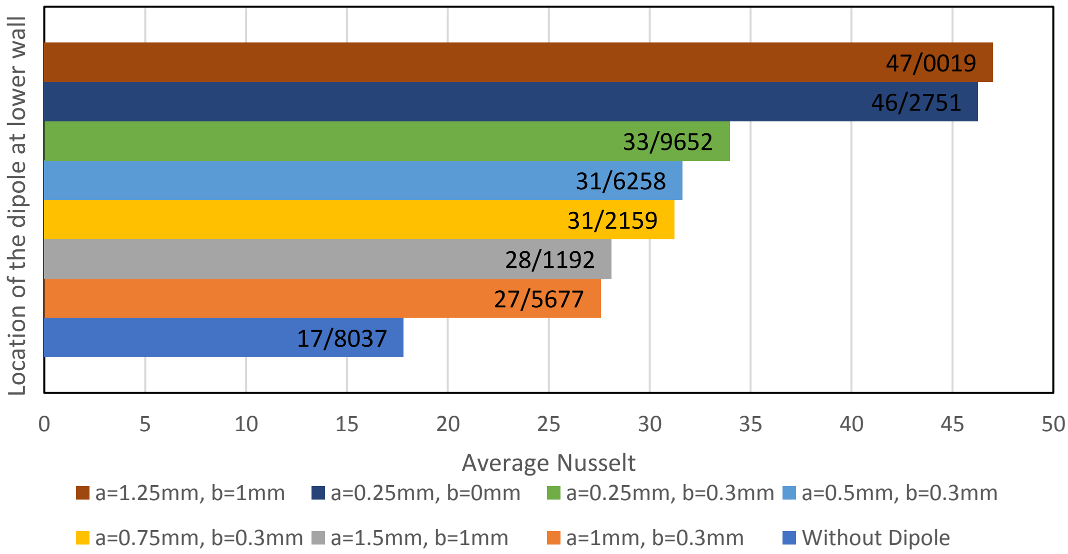
مطابق نتایج به دست آمده در بخش‌های قبل، قرارداد دوقطبی بر دیوار پایین از نظر خنک‌کاری شرایط بهتری را فراهم می‌کند. در این بخش، دوقطبی در گوشه‌های پله‌ها و در فواصل بین دو پله و نزدیک دیوار پایین کانال قرار داده می‌شود. با تغییر هر دو فاصله طولی (a) و فاصله عمودی (b) دوقطبی، تلاش می‌شود تا حالت بهینه برای خنک‌کاری یافت شود. مطابق شکل‌های (۱۲) و (۱۳)، قرار دادن دوقطبی مغناطیسی در محل‌های بحرانی و نزدیک پله که از لحاظ خنک‌کاری مستعد تخریب حرارتی هستند، خنک‌کاری را در بخش‌های بحرانی بهبود می‌دهد. با مقایسه و نتیجه‌گیری از شکل (۸) بخش ۶–۱ و شکل (۱۴)، مشاهده می‌شود که در تقریبا تمامی مکان‌های دوقطبی، با ثابت ماندن فاصله طولی و تغییر فاصله عمودی دوقطبی (نزدیک کردن دوقطبی به دیوار) انتقال حرارت بهبود پیدا می‌کند. مطابق با شکل‌های (۱۳) و (۱۴)، تنها هنگامی که دوقطبی در فاصله طولی ۰/۲۵ میلی‌متر قرار دارد، با نزدیک کردن دوقطبی به دیوار خنک‌کاری در ابتدای پله کاهش پیدا می‌کند که دلیل این اتفاق قرارگیری دوقطبی در ناحیه داغ و تشکیل گردابه است. مطابق بخش‌های قبل با تغییر مکان دوقطبی و نزدیک شدن به محل‌های داغ، گردابه‌های بزرگی ناشی از تعامل برخورد جریان با پله و همچنین میدان مغناطیسی تشکیل می‌شوند. مطابق شکل‌های (۱۳) و (۱۴)، نیز نتیجه می‌شود که قرارگیری دوقطبی دقیقا در پشت پله‌ها (فاصله‌های طولی ۰/۲۵ و ۱/۲۵ میلی‌متر)، بهترین شرایط را از نظر انتقال حرارت مهار می‌کند و مقدار ناسلت متوسط در بهترین حالت در مقایسه با حالت بدون میدان مغناطیسی مقدار، ۱۶۴/۰۵٪ افزایش یافته است.



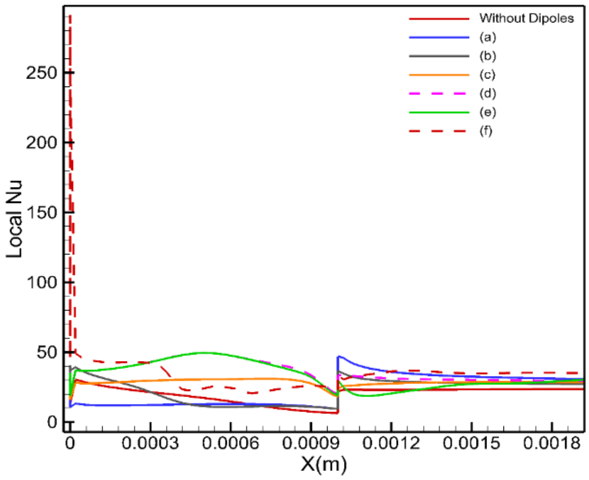
شکل ۱۲ تغییرات عدد ناسلت محلی با تغییر فاصله عمودی و طولی (رینولدز=۲۵، قدرت=۱ آمپر-متر)



شکل ۱۳ تغییرات کانتورهای دما و خطوط جریان با تغییر محل دوقطبی بر دیوار (رینولدز=۲۵، قدرت=۱ آمپر-متر)



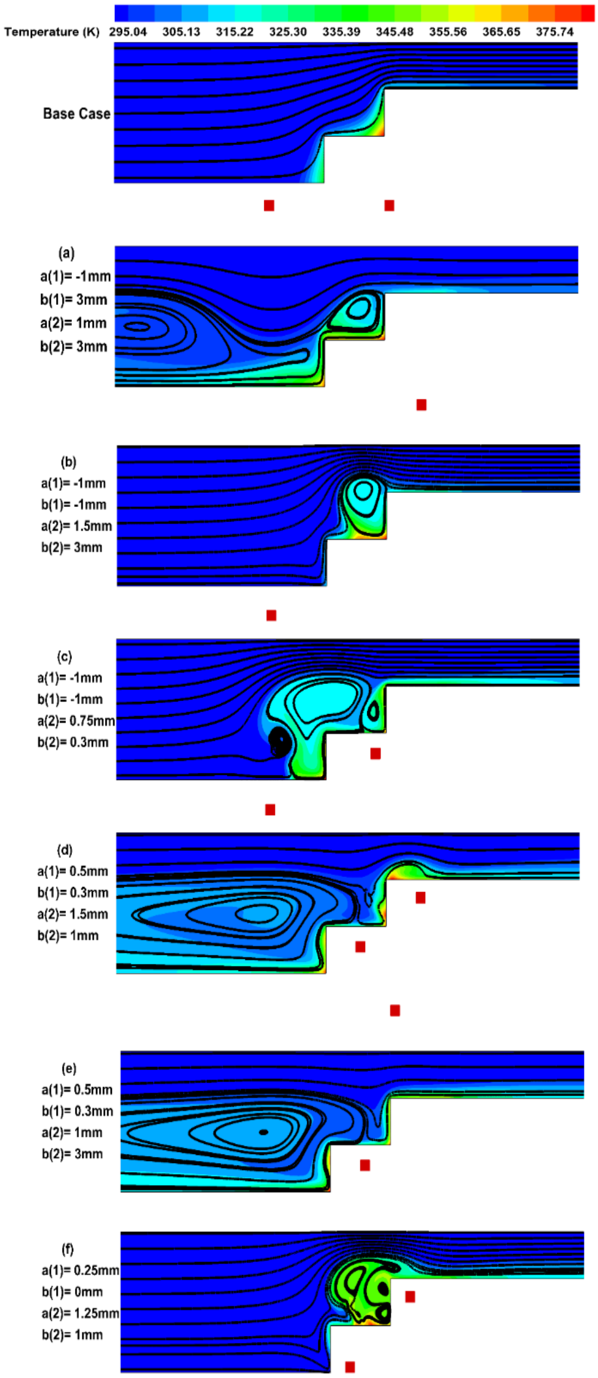
شکل ۱۴ تغییرات عدد ناسلت متوسط با تغییر فاصله عمودی و طولی (رینولدز=۲۵، قدرت=۱ آمپر-متر)



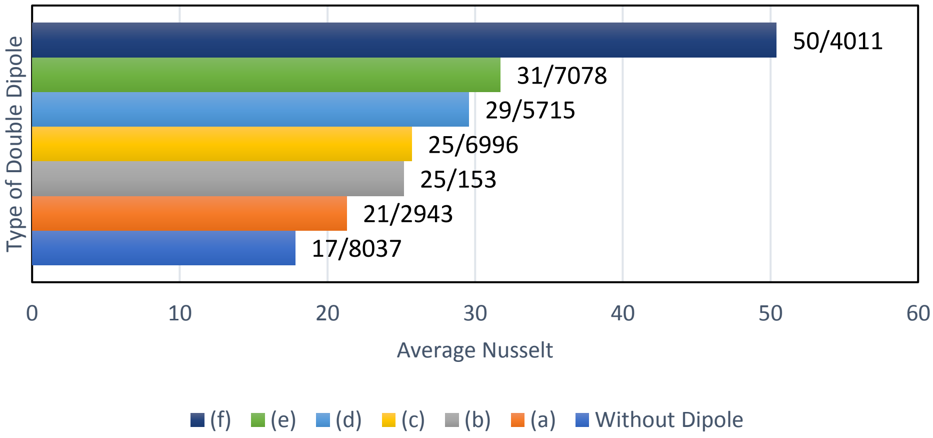
شکل ۱۵ تغییرات عدد ناسلت محلی با تغییر محل دوقطبی‌ها بر دیوار (رینولدز=۲۵، قدرت=۱ آمپر-متر)

اعمال دو دوقطبی مغناطیسی

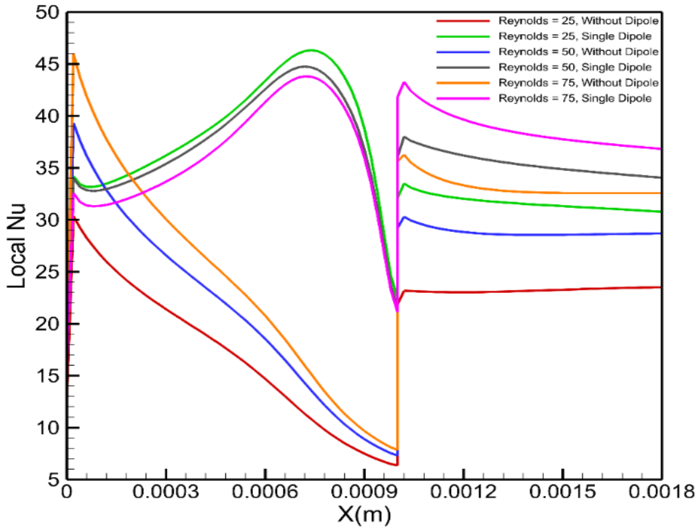
در این بخش، به طور هم‌زمان از دو دوقطبی برای بهبود انتقال حرارت استفاده می‌شود. متناسب با بخش‌های قبل که از تک دوقطبی استفاده شده است، به ترکیب حالت‌های بهینه آن‌ها پرداخته می‌شود تا بهترین محل برای دو دوقطبی پیدا شود. تلاش شده است که با تغییر فاصله عمودی و طولی دوقطبی‌ها و همچنین چیدمان‌های مختلف، بهینه‌ترین حالت برای خنک‌کاری با اعمال دو دوقطبی حاصل شود. مطابق شکل (۱۵)، اگر چیدمان دوقطبی‌ها بین دو پله باشد، (فاصله طولی ۰/۲۵ میلی‌متر و فاصله طولی ۱/۲۵ میلی‌متر)، تغییرات عدد ناسلت محلی حالت یکنواخت‌تری دارد و مانند بخش‌های قبل ناگهان کاهش یا افزایش پیدا نمی‌کند. مطابق شکل (۱۶)، با اعمال دوقطبی‌ها در ناحیه داغ گردابه‌های بزرگی تشکیل می‌شود. مطابق شکل‌های این بخش، بهینه‌ترین حالت از دیدگاه حرارتی برای چیدمان دو دوقطبی، حالت (f) است که دو دوقطبی دقیقا در پشت پله‌های اول و دوم هستند. مطابق نتایج مشاهده شده، استفاده از دو دوقطبی تأثیر بسیار زیادی برای بهبود انتقال حرارت در کانال ندارد و تقریبا نتایج، به نتایج به دست آمده به هنگام استفاده از تک دوقطبی نزدیک است. در نتیجه استفاده از دو دوقطبی با اینکه به نسبت تک دوقطبی مقدار بسیار ناچیزی انتقال حرارت را بهتر می‌کند، اما به دلیل اضافه‌کردن یک المان بیشتر و پیچیده‌تر شدن سیستم توصیه نمی‌شود. مطابق شکل (۱۷)، مقدار ناسلت متوسط در مقایسه با حالت بدون میدان مغناطیسی مقدار، ۱۸۳/۱۴٪ افزایش یافته است که در مقایسه با بهترین حالت تک دوقطبی، حدود ۶/۷۴٪ انتقال حرارت را بهتر کرده است و استفاده از دو دوقطبی توصیه نمی‌شود.



شکل ۱۶ تغییرات کانتورهای دما و خطوط جریان با تغییر محل دوقطبی‌ها بر دیوار (رینولدز=۲۵، قدرت=۱ آمپر–متر)



شکل ۱۷ تغییرات عدد ناسلت متوسط با تغییر محل دو دوقطبی (رینولدز=۲۵، قدرت=۱ آمپر–متر)



شکل ۱۸ تغییرات عدد ناسلت محلی با تغییر عدد رینولدز (قدرت=۱ آمپر–متر)

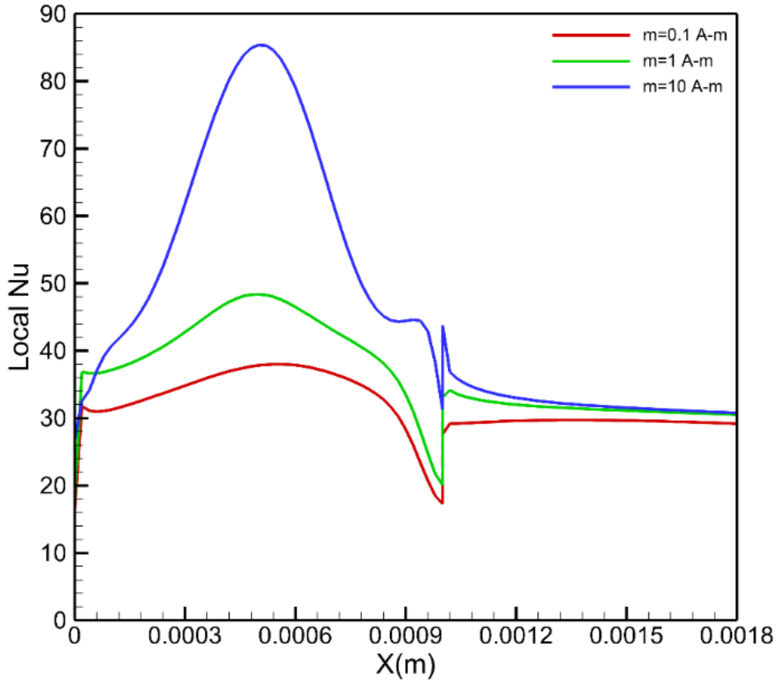
تأثیر تغییر عدد رینولدز بر مشخصه‌های جریان

در این بخش، تأثیر افزایش عدد رینولدز بر میزان اثر میدان مغناطیسی بررسی شده است. مطابق شکل (۱۸)، نتایج به دست آمده با حالت بدون استفاده از دوقطبی مقایسه شده است. با افزایش عدد رینولدز، خنک‌کاری به دلیل افزایش اختلاط و مومنتوم ذرات در نزدیکی دیواره افزایش می‌یابد. با اعمال تک دوقطبی مغناطیسی بر دیوار پایین در فاصله طولی ۰/۷۵ میلی‌متر و فاصله عمودی ۰/۳ میلی‌متر، با افزایش رینولدز مشاهده می‌شود که اثر میدان مغناطیسی ناشی از دوقطبی کاهش پیدا می‌کند. طبق شکل (۱۸)، مشاهده می‌شود که عدد ناسلت محلی در محلی که تک دوقطبی مغناطیسی اعمال شده است، در جریانی که دارای رینولدز ۲۵ است، بیشتر است از جریانی که دارای رینولدز ۷۵ است. همین طور، اختلاف عدد ناسلت محلی برای جریان با رینولدز ۲۵ در حالت با میدان و بدون میدان نسبت به جریان با رینولدز ۷۵ بیشتر است که هر چه اختلاف بیشتر باشد به این معنی است که اثر دوقطبی بیشتر است.

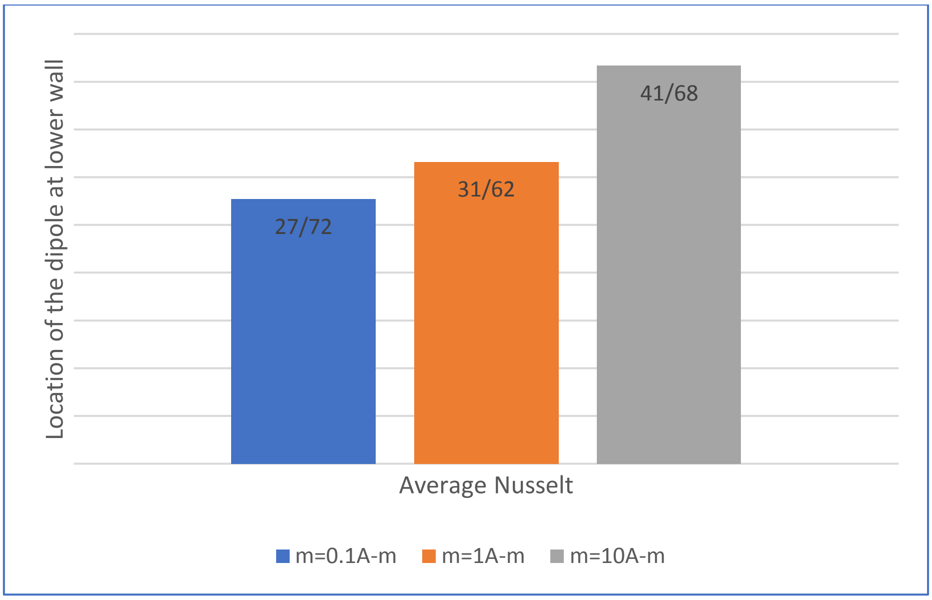
تأثیر تغییر قدرت دوقطبی بر مشخصه‌های جریان

در این بخش، تأثیر تغییر قدرت دوقطبی مغناطیسی بر میزان انتقال حرارت بررسی شده است. برای مدل‌سازی در این بخش، دوقطبی مغناطیسی بر دیوار پایین و در فاصله طولی ۰/۵ میلی‌متر و فاصله عمودی ۰/۳ میلی‌متر از دیوار قرار داده شده است. طبق

شکل (۱۹) و (۲۰)، با افزایش قدرت دوقطبی، عدد ناسلت محلی در بخشی که میدان مغناطیسی مؤثر است، افزایش پیدا می‌کند و با کاهش دوقطبی نیز عدد ناسلت محلی به مقدار قابل توجه کاهش می‌یابد.



شکل ۱۹ تغییرات عدد ناسلت محلی با تغییر قدرت دوقطبی (رینولدز=۲۵)



شکل ۲۰ تغییرات عدد ناسلت متوسط با تغییر قدرت دوقطبی (رینولدز=۲۵)

نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت خنک‌کاری مؤثر در دستگاه‌های شامل بوردهای الکترونیکی بسیار چگال، در این تحقیق به امکان‌سنجی استفاده از دوقطبی‌های مغناطیسی به منظور بهبود انتقال حرارت در جلوی دو پله پیشرو پرداخته شده است. هدف تعیین تأثیر پارامترهای مختلف نظر مکان و تعداد دوقطبی، قدرت و عدد رینولدز جریان پرداخته شده است. مطابق با بررسی‌ها و مدل‌سازی‌های انجام شده نتایج نشان می‌دهند که:

۱. اعمال تک دوقطبی مغناطیسی بر دیوار پایین، موجب بهبود عدد ناسلت محلی و عدد ناسلت متوسط نسب به حالت بدون میدان مغناطیسی می‌شود و با قرارگیری دوقطبی در فاصله طولی صفر میلی‌متر بهینه‌ترین حالت افزایش عدد ناسلت متوسط ۵۶/۵۷٪ نتیجه می‌شود.

۲. اعمال تک دوقطبی مغناطیسی بر دیوار بالا نیز موجب بهبود مشخصه‌های انتقال حرارت می‌شود، اما به نسبت قرارگیری دوقطبی در دیوار پایین کمتر است. با قرارگیری دوقطبی در فاصله طولی ۱/۵ میلی‌متر بهینه‌ترین حالت و افزایش عدد ناسلت متوسط ۴۹/۸۸٪ نتیجه می‌شود.

۳. با اعمال تک دوقطبی در نواحی بحرانی و گوشه‌های پله‌ها، نتیجه می‌شود که بهترین عملکرد از دیدگاه حرارتی و بیشترین ناسلت متوسط (۱۶۴٪/۰۵)، به هنگام اعمال دوقطبی در پشت پله‌ها نتیجه (فاصله طولی ۰/۲۵ میلی‌متر و فاصله طولی ۱/۲۵ میلی‌متر) می‌شود.

۴. اعمال دو دوقطبی بر کانال، باعث افزایش ناسلت محلی و ناسلت متوسط (۱۸۳٪/۱۴) می‌شود، اما نسبت به حالت تک دوقطبی مقدار بسیار ناچیزی (۶٪/۷۴) است. بهترین عملکرد خنک‌کاری، هنگامی است که دو دوقطبی را در پشت پله‌های کانال (فاصله طولی ۰/۲۵ میلی‌متر و فاصله طولی ۱/۲۵ میلی-متر) قرار داده شده است.

۵. افزایش عدد رینولدز موجب بهبود بیشتر انتقال حرارت می-شود، اما اثر میدان مغناطیسی ناشی از دوقطبی را کاهش می-دهد.

۶. افزایش قدرت میدان مغناطیسی ناشی از دوقطبی به میزان قابل توجه موجب افزایش عدد ناسلت محلی می‌شود.

فهرست علائم

توضیح	پارامتر
مختصات دوقطبی مغناطیسی (m)	a
مختصات دوقطبی مغناطیسی (m)	b
چگالی شار مغناطیسی (T)	B
گرمای ویژه (kJ/kg.ºC)	Cp
میانگین قطر نانوذره (m)	d
قطر هیدرولیک (m)	D_h
بردار یکه	e_r
بردار یکه	e_θ
ترم نیرویی در معادلات مومنتوم (N/m^3)	f
شتاب جاذبه (m/s^2)	g
شدت میدان مغناطیسی (A/m)	H
ضریب انتقال حرارت ($W/(m^2.K)$)	h
پارامتر در شکل ۱(m)	H
هدایت حرارتی (W/m.K)	K
ثابت بولتزمن (J/K)	k_B
پارامتر در شکل ۱(m)	L
پارامتر لانژوین	L(α)
مغناطش ماده (A/m)	M
قدرت دوقطبی مغناطیسی (A.m)	m
دامنه مغناطش (A/m)	M_d
مغناطش اشباع (T)	M_s
عدد ناسلت	Nu
فشار (Pa)	p
شعاع در مختصات قطبی(m)	r
عدد رینولدز	Re
پارامتر در شکل یک (m)	S
دما (ºC, K)	T
شار گرمایی (W/m^2)	q”
دمای ورودی (ºC)	Tin
دمای دیوار (ºC)	Tw
سرعت در راستای طولی (m/s)	u
سرعت ورودی (m/s)	U_{in}
سرعت در راستای مختصات عرضی (m/s)	v
بردار سرعت (m/s)	$\vec{V}$
سرعت متوسط (m/s)	$\bar{V}$
پتانسیل اسکالر مغناطیسی (A)	V_m
مختصات طولی	x
مختصات محوری	y

علائم یونانی

ویسکوزیته دینامیکی (Pa.s)	μ
نفوذپذیری در خلأ (N/A^2)	μ_0
لانژوین پارامتر	α
زاویه در مختصات قطبی	θ

ρ	چگالی (kg/m^3)
φ	غلظت فروسیال (%)

زیرنویس

h	هیدرولیک
in	ورودی
w	دیوار

واژه‌نامه

لانژوین	Langevin
مغناطش	Magnetization
بردار میدان مغناطیسی	Magnetic field vector
پتانسیل اسکالر مغناطیسی	Magnetic scalar potential
فروتک	Ferrotec
انسیس فلوئنت ۲۰۲۱	Ansys Fluent 2021 R1

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] A. Siricharoenpanich, S. Wiriyasart, P. Naphon, “Study on the thermal dissipation performance of GPU cooling system with nanofluid as coolant,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 25, p. 100904, (2021) doi: 10.1016/j.csite.2021.100904.

[2] F. M. Naduvilakath-Mohammed, R. Jenkins, G. Byrne, A. J. Robinson, “Closed loop liquid cooling of high-powered CPUs: A case study on cooling performance and energy optimization,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 50, p. 103472, (2023). doi: 10.1016/j.csite.2023.103472.

[3] M. Gorzin, A. A. Ranjbar, and M. J. Hosseini, “Experimental and numerical investigation on thermal and hydraulic performance of novel serpentine minichannel heat sink for liquid CPU cooling,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 3375–3385, (2022), doi:10.1016/j.egyr.2022.02.179.

[4] H. Bahrami, M. Ghaedi, A. Attarzadeh, “Employing nonuniform magnetic fields to improve energy transfer of flow after a sudden expansion inside a miniature channel: A hydrothermal study,” *Engineering Reports*, vol. n/a, no. n/a, p. e12847, doi: 10.1002/eng2.12847.

[5] R. W. Mei, A. Plotkin, “Navier-Stokes solutions for laminar incompressible flows in forward-facing step geometries,” *AIAA Journal*, vol. 24, no. 7, pp. 1106–1111, 1986, doi: 10.2514/3.9399.

[6] H. Stüer, A. Gyr, W. Kinzelbach, “Laminar separation on a forward facing step,” *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, vol. 18, no. 4, pp. 675–692, (1999), doi: 10.1016/S0997-7546(99)00104-1.

[7] D. Wilhelm, C. Hrtel, and L. Kleiser, “Computational analysis of the two-dimensionalthree-dimensional transition in forward-facing step flow,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 489, pp. 1–27, (2003), doi: 10.1017/S0022112003004440.

[8] J. G. Barbosa-Saldaña, N. K. Anand, “Flow Over a Three-Dimensional Horizontal Forward-Facing Step,” *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, vol. 53, no. 1, pp. 1–17, (2007), doi:10.1080/10407780701446473.

[9] K. Javaherdeh, H. Karimi, “Numerical analysis of the obstacle effect with different geometry on the heat transfer of nanofluid flow in a rectangular channel,” *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 35, no. 3, pp. 51–64, (2023). doi:10.22067/jacsm.2023.69607.1020.

[10] K. Javaherdeh, H. Karimi, “Numerical analysis of mix convection of sodium alginate non-Newtonian fluid with Al2O3 nanoparticle in a channel with block,” *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 32, no. 1, pp. 93–110, (2021). doi:10.22067/jacsm.2021.40042.

[11] H. Sayehvand and A. Basiri Parsa, “Numerical and Analytical Investigation of Thermal Dispersion Effects on the Heat Transfer of Nanofluid flow inside a Channel,” *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 29, no. 2, pp. 21–40, (2018), doi:10.22067/fum-mech.v29i2.58387.

[12] A. Ahmadi Nadooshan, D. Bahrami, M. Bayareh, “Numerical study of forced convection in a microchannel in the presence of nanofluid using the slip condition,” *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 34, no. 4, pp. 53–64, (2022). doi:10.22067/jacsm.2022.77928.1133.

[13] A. Sh. Kherbeet, H. A. Mohammed, B. H. Salman, H. E. Ahmed, O. A. Alawi, M. M. Rashidi, “Experimental study of nanofluid flow and heat transfer over microscale backward- and forward-facing steps,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 65, pp. 13–21, (2015). doi:10.1016/j.expthermflusci.2015.02.023.

[14] A. Sh. Kherbeet, H. A. Mohammed, K. M. Munisamy, B. H. Salman, “Combined convection nanofluid flow and heat transfer over microscale forward-facing step,” *International Journal of Nanoparticles*, vol. 7, no. 1, p. 1, (2014), doi:10.1504/IJNP.2014.062008.

[15] A. Barman and S. K. Dash, “Effect of obstacle positions for turbulent forced convection heat transfer and fluid flow over a double forward facing step,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 134, pp. 116–128, (2018). doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2018.08.009.

[16] K. U. Rehman, W. Shatanawi, A. B. Çolak, “Thermal analysis of flowing stream in partially heated double forward-facing step by using artificial neural network,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 37, p. 102221, (2022), doi:10.1016/j.csite.2022.102221.

[17] H. Talaei and H.-R. Bahrami, “Backward-facing step heat transfer enhancement: a systematic study using porous baffles with different shapes and locations and corrugating after step wall,” *Heat and Mass Transfer*, vol. 59, no. 12, pp. 2213–2230, (2023).

[18] H. Togun, G. Ahmadi, T. Abdulrazzaq, A. J. Shkarah, M. S. Newaz Kazi, A. Badarudin, M. R. Safaei, “Thermal performance of nanofluid in ducts with double forward-facing steps,” *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, vol. 47, pp. 28–42, (2015), doi:10.1016/j.jtice.2014.10.009.

[19] H. Togun, R. Homod, T. Abdulrazzaq, “Hybrid Al2O3-Cu/water nanofluid flow and heat transfer over vertical double forward-facing step,” *Thermal Science*, vol. 25, no. 5 Part A, pp. 3517–3529, (2021), doi: 10.2298/TSCI201130080T.

[20] R. Ganguly, S. Sen, I. K. Puri, “Heat transfer augmentation using a magnetic fluid under the influence of a line dipole,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 271, no. 1, pp. 63–73,(2004.) doi: 10.1016/j.jmmm.2003.09.015.

[21] M. Ghasemian, Z. Najafian Ashrafi, M. Goharkhah, M. Ashjaee, “Heat transfer characteristics of Fe_3O_4 ferrofluid flowing in a mini channel under constant and alternating magnetic fields,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 381, pp. 158–167, (2015.) doi:10.1016/j.jmmm.2014.12.078.

[22] M. Ashjaee, M. Goharkhah, L. A. Khadem, R. Ahmadi, "Effect of magnetic field on the forced convection heat transfer and pressure drop of a magnetic nanofluid in a miniature heat sink," *Heat and Mass Transfer*, vol. 51, no. 7, pp. 953–964, (2015). doi: 10.1007/s00231-014-1467-1.

[23] M. Bezaatpour, M. Goharkhah, "A magnetic vortex generator for simultaneous heat transfer enhancement and pressure drop reduction in a mini channel," *Heat Transfer*, vol. 49, no. 3, pp. 1192–1213, (2020). doi: 10.1002/htj.21658.

[24] R. K. Shah, S. Khandekar, "Exploring ferrofluids for heat transfer augmentation," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 475, pp. 389–400, (2019). doi:10.1016/j.jmmm.2018.11.034.

[25] Z. Mehrez, A. El Cafsi, "Forced convection magnetohydrodynamic Al_2O_3–Cu/water hybrid nanofluid flow over a backward-facing step," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 135, no. 2, pp. 1417–1427, (2019). doi: 10.1007/s10973-018-7541-z.

[26] M. Atashafrooz, M. Sheikholeslami, H. Sajjadi, A. Amiri Delouei, "Interaction effects of an inclined magnetic field and nanofluid on forced convection heat transfer and flow irreversibility in a duct with an abrupt contraction," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 478, pp. 216–226, (2019). doi: 10.1016/j.jmmm.2019.01.111.

[27] F. Selimefendigil, H. F. Öztop, "Hydro-thermal performance of CNT nanofluid in double backward facing step with rotating tube bundle under magnetic field," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 185, p. 105876, (2020), doi: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105876.

[28] A. Allahverdizadeh, B. Dadashzadeh, H. Azimzadeh, "Nonlinear Vibration Analysis of Fluid Conveying Microtube under Parametric Magnetic Excitation," *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 31, no. 1, pp. 69–86, (2020). doi:10.22067/fum-mech.v31i1.80049.

[29] F. Moradi and P. Pournaderi, "Simulation of nanofluid flow at low Reynolds number in a microchannel with one-sided sudden expansion under the effect of a magnetic field," *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 35, no. 3, pp. 85–100, (2023). doi:10.22067/jacsm.2023.79298.1143.

[30] S. Bazkhane, I. Zahmatkesh, "Heat Transfer of Nanofluid in a Channel with Magnetic Field and Porous Obstacle using the Darcy-Brinkman-Forchheimer Model in the LBM Method," *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 32, no. 1, pp. 153–172, (2021). doi: 10.22067/jacsm.2021.56842.0.

[31] H. Kazemi, Moghadam, S. S. Baghbani, S. Samadzadeh, H. Babazadeh, "Study of thermal performance of a ferrofluid with multivariable dependence viscosity within a wavy duct with external magnetic force," *Journal of Thermal Analysis & Calorimetry*, vol. 143, no. 5, pp. 3849, (2021) doi: 10.1007/s10973-020-09324-4.

[32] Y. Menni, M. Ghazvini, H. Ameur, M. Kim, M. H. Ahmadi, M. Sharifpur, "Combination of baffling technique and high-thermal conductivity fluids to enhance the overall performances of solar channels," *Engineering with Computers*, vol. 38, no. S1, pp. 607–628, (2022), doi:10.1007/s00366-020-01165-x.

[33] M. Malekan, A. Khosravi, S. Syri, "Heat transfer modeling of a parabolic trough solar collector with working fluid of Fe_3O_4 and CuO/Therminol 66 nanofluids under magnetic field," *Applied Thermal Engineering*, vol. 163, p. 114435, (2019). doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114435.

[34] P. A. Petrini, D. R. Lester, G. Rosengarten, "Enhanced laminar heat transfer via magnetically driven ferrofluids," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 217, p. 124703, (2023), doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124703.

[35] R. K. Shah and S. Khandekar, "Manipulation of Taylor bubble flow in a magneto-fluidic system," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 593, p. 124589, (2020), doi:10.1016/j.colsurfa.2020.124589.

[36] M. Goharkhah, M. Esmaeili, M. Ashjaee, "Numerical Simulation and Optimization of Forced Convection Heat Transfer of Magnetic Nanofluid in a Channel in the Presence of a Non-Uniform Magnetic Field," *Journal of Space Science and Technology*, vol. 11, no. 2, pp. 11-19, (2018).

[37] R. E. Rosensweig, *Ferrohydrodynamics, Dover edition. Mineola*, New York: Dover Publications, Inc, 2014, [E.book].

[38] R. K. Shah, J. K. Drave, S. Khandekar, "Thermal Transport in Laminar Convective Flow of Ferrofluids in the Presence of External Magnetic Field," *Journal of Heat Transfer*, vol. 143, no. 6, p. 062101, (2021). doi: 10.1115/1.4050411.

[39] H. K. Pazarlıoğlu, R. Ekiciler, K. Arslan, N. Adil Mohammed Mohammed, "Exergetic, Energetic, and entropy production evaluations of parabolic trough collector retrofitted with elliptical dimpled receiver tube filled with hybrid nanofluid," *Applied Thermal Engineering*, vol. 223, p. 120004, (2023). doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.120004.

[40] A. Dahmani, J. Muñoz-Cámara, S. Laouedj, J. P. Solano, "Heat transfer enhancement of ferrofluid flow in a solar absorber tube under non-uniform magnetic field created by a periodic current-carrying wire," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 52, p. 101996, (2022). doi:10.1016/j.seta.2022.101996.

[41] https://ferrofluid.ferrotec.com/products/ferrofluid-emg/water/

[42] H. Bahrami, M. Ghaedi, "Using a non-uniform magnetic field to enhance heat transfer before a sudden compression in A 2D milli-channel," *Journal of Enhanced Heat Transfer*, vol. 31, no. 4, pp. 45–69, (2024). doi: 10.1615/JEnhHeatTransf.2023050891.

[43] B. F. Armaly, F. Durst, J. C. F. Pereira, B. Schönung, "Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 127, no. 1, p. 473, (1983), doi:10.1017/S0022112083002839.

[44] G. Biswas, M. Breuer, F. Durst, "Backward-Facing Step Flows for Various Expansion Ratios at Low and Moderate Reynolds Numbers," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 126, no. 3, pp. 362–374, (2004), doi: 10.1115/1.1760532.

[45] M. M. Klazly, G. Bognár, "CFD investigation of backward - facing step nanofluid flow," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1564, no. 1, p. 012010, (2020). doi: 10.1088/1742-6596/1564/1/012010.

[46] W. Wu and A. Kumar, "Numerical Investigation of Nanofluid Flow over a Backward Facing Step," *Aerospace*, vol. 9, no. 9, p. 499, (2022.) doi: 10.3390/aerospace9090499.

[47] M. Bezaatpour, M. Goharkhah, "Effect of magnetic field on the hydrodynamic and heat transfer of magnetite ferrofluid flow in a porous fin heat sink," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 476, pp. 506–515, (2019), doi: 10.1016/j.jmmm.2019.01.028.

[48] O. A. Hussein, “Laminar Mixed Convective Nanofluid Flow in a Channel with Double Forward-Facing Steps: A Numerical Simulation Study,” *Tikrit Journal of Engineering Sciences*, vol. 24, no. 1, pp. 38–49, **(**2017**)**, doi: 10.25130/tjes.24.1.04.